

순산소를 이용한 난류확산화염의 연소 특성에 관한 실험적 연구

곽지현* · 전충환** · 장영준**

An experimental study on the combustion characteristics using pure oxygen in a turbulent diffusion flame

Ji-hyun Kwark, Chung-hwan Jeon, Young-june Chang

Key Words: Pure oxygen, Swirl number, Oxygen excess ratio

Abstract

Combustion using pure oxygen instead of air is an energy saving technology that can increase thermal efficiency by the improvement of burning rate and ultra high temperature flame, being used on the industrial spot. But information about it is not so enough yet. Flame figure, temperature distribution and emission concentration were measured with oxygen excess ratio and swirl number in a turbulent diffusion flame to investigate the combustion characteristics using pure oxygen. The results showed that flame figure became different as long as oxygen excess ratio varied and that concentration of NO and CO increased suddenly around $\lambda=1.5$.

기호설명

R : 버너 스톱트 반경

S : 선회수

x/R : 축방향 무차원 거리

r/R : 반경방향 무차원 거리

λ : 산소과잉률

1. 서론

철강 분야에서도 더욱 특수하고 다양한 품질의 재료가 요구되고 있는 요즘

주물 회전 용해로에 사용되는 연소기는 무척 높은 고온의 화염을 필요로 한다. 일반적으로 전기유도도가 많이 사용되나 우리 나라와 같이 전력 수급이 불안정하고 비싼 곳에서는 별로 경제적이지 못하다. 고온의 화염을 위해서는 높은 연소 부하가 필요한데 연료의 종류에 따라 발열량이 한정되어 있어 이의 실현이 용이하지 못한 형편이다. 그러나 일반 공기 대신 순산소를 산화제로 이용할 경우 매우 높은 고온의 화염을 얻을 수 있어 경제적인 생산을 가능케 해준다. 국내에서도 이를 적용한 연소기가 현장에서 사용되고 있으나 이러한 연소기의 연소 특성은 잘 알려져 있지 못하다.

* 부산대학교 대학원 기계공학과

** 부산대학교 기계공학부

본 연구에서는 공업로에서 많이 사용되는 난류 확산 화염을 가지는 연소기에서 순산소를 산화제로 사용하여 산소과잉률과 선회수에 따라 화염의 형상, 화염 온도 분포, 연소가스의 농도 조성을 통해 순산소를 이용한 연소 특성을 규명하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1. 실험 장치

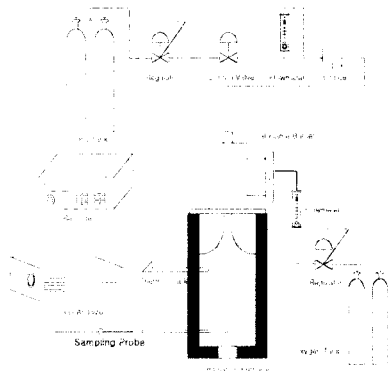


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

본 연구에서 사용된 실험 장치는 Fig. 1과 같이 크게 버너와 연소로, 연료 및 산화제 공급장치, 온도 취득 장치, 화염 사진 취득 장치, 연소가스 분석 장치로 구성되어 있다. 버너는 Fig. 2와 같이 목(throat) 부위에서 타일 쪽으로 갈수록 직경이 넓어지는 나팔관형 모양으로 타일부 직경 250mm, 목 직경 34mm, 목 직관부 길이 65mm, 곡률반경 56mm의 벤치스케일 버너이다. 연료는 직경 2mm인 12개의 노즐을 통해 반경 방향으로 분출되어 공기와 수직으로 혼합된다. 연료 노즐 주위는 선회기가 감싸고 있으며 두께 15mm의 원형 스테인리스 강에 2mm×3.5mm 크기의 슬릿상의 분출구 6

개를 가지고 있어 산화제는 축방향으로 각 선회수에 따라 선회 유동을 하며 공급된다. 실험에서 사용한 선회기는 4가지로 각각 축방향에 대해 0, 0.26, 0.6, 1.24의 선회수를 가진다. 연소로는 내면이 250mm×250mm×500mm의 크기이고 두께 100mm의 내화제로 단열 되어있다. 산화제(O₂, 99%)는 산소 탱크로부터 공급되며, 레귤레이터와 유량계가 있어 유량을 조절할 수 있다. 화염 및 노 내의 온도 분포 측정을 위해 버너 타일 위에 반경 방향으로 R-type 열전대 6개, 축방향으로 3개를 설치하고 K-type도 노 하단 쪽에 2개 설치하여, 30채널 동시 측정이 가능한 온도 기록 장치로 측정하였다. 화염의 형상과 가시적 길이 측정을 위해 디지털 카메라(MX-2900Z)를 이용하여 화염을 촬영하였으며, 연소가스의 농도 분석은 전기 화학 센서가 장착된 배가스 분석기(KM-9106)로 하였다.

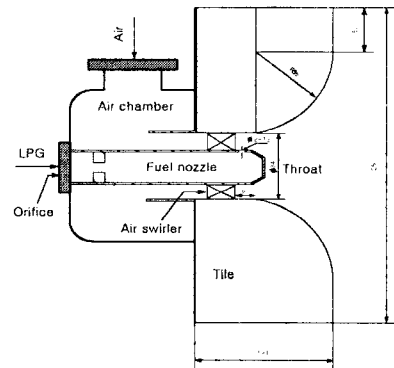


Fig. 2 Specification of the burner

2.2. 실험 방법

본 연구에서 사용된 버너는 나팔관형 타일을 가지는 난류 비예혼합 버너로서, 프로판 연료를 사용하여 각각 연소 부하 3.03, 6.06 kW의 조건에서 산화제의 산소과잉률과 선회수에 따라 화염의 형상과 크기, 단열 화염 온도, 배가스 농도를

측정하였다. 본 연구에서 정의한 산소과잉률(λ)은 실제 산소연료비를 이론 산소연료비로 나눈 값이다. 실험 조건을 Table 1에 나타낸다.

Table 1 Experimental condition

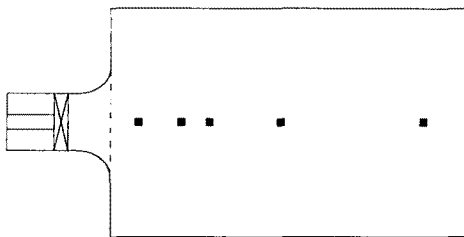
Item	Condition	
	Propane	
Combustion load	3.03 kW	6.06 kW
Oxygen excess ratio	1.0 ~ 4.0	0.7 ~ 2.0
Swirl No.	0, 0.26, 0.6, 1.24	0

2.2.1 화염 형상 및 크기 측정

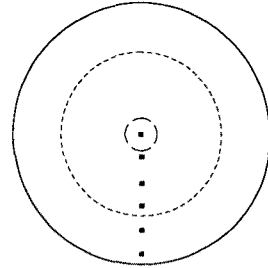
230만 화소를 갖는 디지털 카메라(MX-2900Z)를 이용하여 촬영하였으며, 화염의 길이는 각 조건에서 30장의 사진을 촬영한 뒤 평균하여 측정하였다.

2.2.2 온도 분포 측정

버너 노즐로부터 각각 축 방향과 반경 방향으로 측정하여 버너 목의 반경(R)으로 나누어준 무차원 거리에 따라 나타내었으며 측정한 열전대의 위치는 그림과 같다.



(a) In the furnace



(b) On the burner tile

Fig. 3 Position of thermocouples for the temperature measuring

2.2.3 연소 가스 농도 측정

단열로의 연소 가스 배출구에 프로브를 삽입하여 배가스 분석기로 NO와 CO의 농도(ppm) 및 O₂의 농도(%)를 측정하였다. 그림에 표시한 NO 및 CO의 농도는 산소 농도 11%로 환산한 값이다.

3. 실험결과 및 고찰

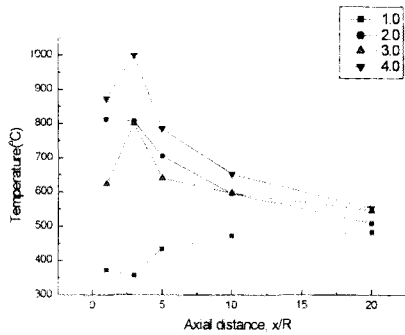
3.1. 화염 형상 및 크기

산소과잉률이 커질수록 화염의 길이는 짧아지고, 폭은 가늘어지며, 밝기도 급격히 증가한다.

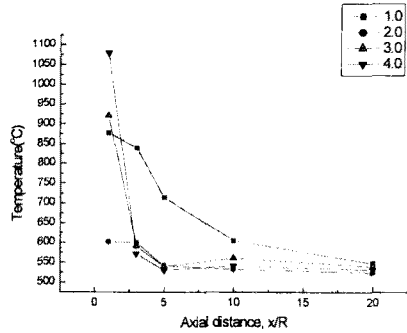
3.2. 로내 화염의 온도 분포

3.2.1 축방향 온도 분포

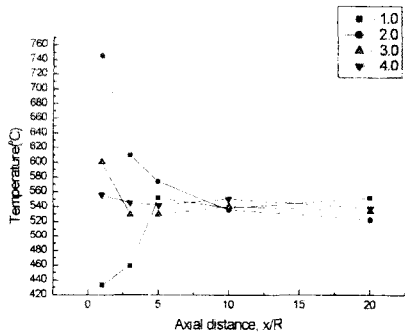
Fig. 4는 연소부하 3.03 kW 일 때 각 선회수에서 산소과잉률 별로 로 내 축방향 화염의 온도분포를 나타낸 그림이다. (a)에서 보듯이 선회수 0인 일반화염에서는 산소과잉률이 높을수록 화염온도도 높아진다. 그러나 선회수 0.6 이상에서는 $\lambda=2$ 일 때 최고 온도가 나타난다. 선회수가 증가하면서 연료와 산소가 잘 혼합되지만 산소가 너무 과잉되면 희박한 조건이 되어 화염온도가 낮아진다고 생각된다. 이 선회수에서 산소과잉률 1일 때



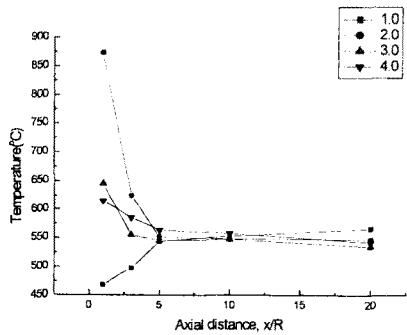
(a) $S=0$



(b) $S=0.26$



(c) $S=0.6$



(d) $S=1.24$

Fig. 4 Axial temperature distribution with oxygen excess ratio

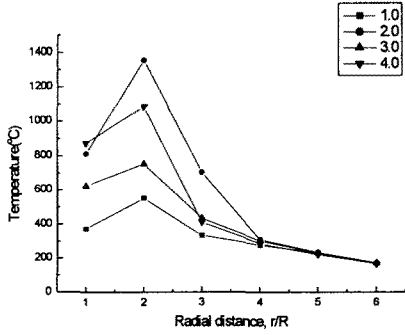
의 화염은 노즐 선단에서 화염 하류로 갈수록 온도가 증가한다. 하지만 λ 가 3 이상일 때는 거꾸로 노즐 가까이에서 온도가 높고 화염 하류로 갈수록 낮아진다. 이것은 나팔관 모양인 버너 타일의 특별한 형상에 의한 것으로 산소과잉률이 커지면서 산소의 유동 모멘텀이 커지고 따라서 버너 타일을 따라 평면화염이 형성되기 때문이다. 타일면에 평면화염이 형성되면 버너 중심부에 강한 후류가 형성되어 연소가스의 재순환이 이루어지고 화염의 온도를 낮추어주는 효과가 있고 노 내에서 복사열전달에 의해 피열체가 균일하게 가열된다. 또한 $\lambda=2$ 일 때 온도 구배가 가장 크다. 이는 연소가스

의 농도 조성에도 큰 영향을 미치게 된다.

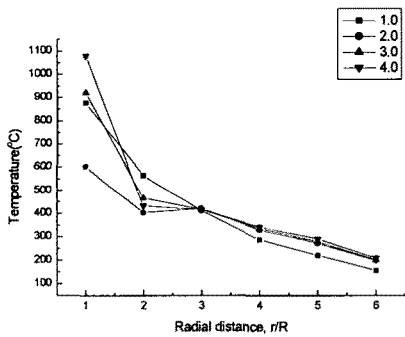
3.2.2 반경방향 온도분포

Fig. 5는 연소부하 3.03 kW 일 때 각 선회수에서 산소과잉률 별로 버너 타일 위 $x/R=1$ 위치에서 반경방향 화염의 온도분포를 나타낸 그림이다. (a) $S=0$ 인 일산화염에서 산소과잉률 2일 때 최고온도 분포를 보이는데 연료와의 확산정도가 가장 양호한 것으로 판단된다. 이런 경향은 $S=0.6$ 에서도 비슷하게 나타나지만 $S=1.24$ 가 되면 완전한 평면화염이 형성되면서 반경방향으로 최고 온도 지점의 이동이 나타난다. 산소과잉률이 커지면

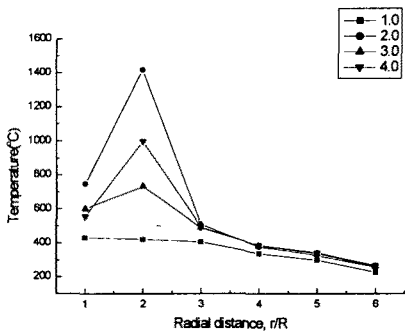
서 유량이 증가하고 반경방향으로 모멘텀이 커져 타일면 전체에 화염이 존재하게 되고 타일 반경 중앙에서 최고 온도가 나타난다.



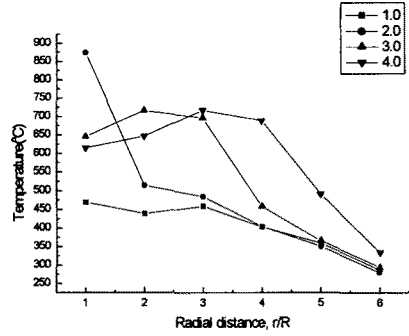
(a) $S=0$



(b) $S=0.26$



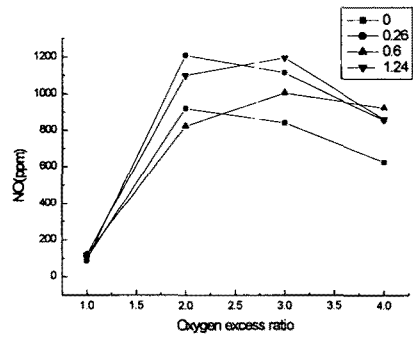
(c) $S=0.6$



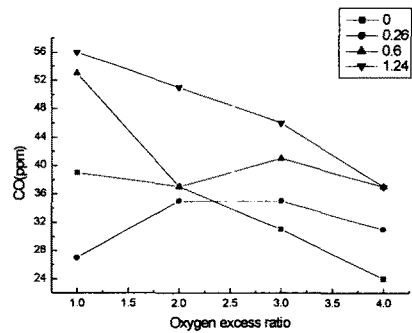
(d) $S=1.24$

Fig. 5 Radial temperature distribution with oxygen excess ratio

3.3 연소가스 농도분포



(a) NO concentration



(b) CO concentration

Fig. 6 Emission concentration with oxygen excess ratio

Fig. 6은 산소과잉률에 따른 NO와 CO의 농도를 나타낸다. NO는 $\lambda=1.0$ 과 2.0 사이에서 급격히 증가하고, 그 이후에 선 감소한다. $\lambda=2.0$ 일 때 화염의 온도가 가장 높을 때 펠도비치 기구에 의한 열적 NO가 다량 생성되기 때문으로 생각된다. 선회수 0.26에서 NO가 많이 발생하는데 이는 연료와의 혼합이 촉진되는 반면 평면화염이 제대로 형성되지 않아 후류에 의한 영향이 적기 때문으로 생각된다. CO의 농도는 산소과잉률 증가에 따라 감소하는 경향을 보이며 특히 $S=1.24$ 에서 뚜렷하다. 그러나 선회수가 증가할수록 CO의 농도는 증가하며 NO와 대조적으로 $S=0.26$ 에서 발생량이 작다.

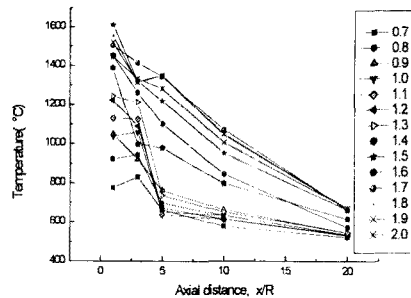
3.4 이론 산소연료비 근처에서의 연소 특성

3.4.1 로 내 온도분포

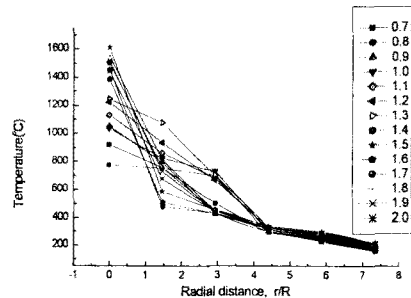
Fig. 7은 산소과잉률 0.7에서 2.0 사이에서 연소부하 6.06 kW, $S=0$ 일 때 단열로 내 화염의 축 및 반경 방향 온도 분포를 나타낸다.

(a)에서 $\lambda=1.5$ 일 때까지 산소과잉률이 증가할수록 온도분포도 증가하고 그 이후에서 감소하고 있다. 따라서 $\lambda=1.5$ 까지는 산소가 증가할수록 연료와의 확산이 촉진되는 것으로 생각된다. $\lambda=1.0$ 에 비해서 1.5일 때 최고 온도는 거의 두 배에 이르며, 이에 따른 NO 발생도 크게 증가할 것으로 생각된다. (b)에서 화염 중심에서는 $\lambda=1.5$ 이상에서 온도가 높지만 반경방향으로 갈수록 반대의 경향을 보인다. 즉 산소과잉률이 1.5 이상에선 화염의 폭이 가늘고 좁아지는 것을 알 수 있다. 산소과잉률이 커질수록 화염중심과 가장자리의 농도 구배가 커지며 $\lambda=1.3$ 과 1.4를 경계로 특성이 급격히

달라진다.



(a) Axial direction



(b) Radial direction

Fig. 7 Temperature distribution with oxygen excess ratio

3.4.2 연소가스 농도분포

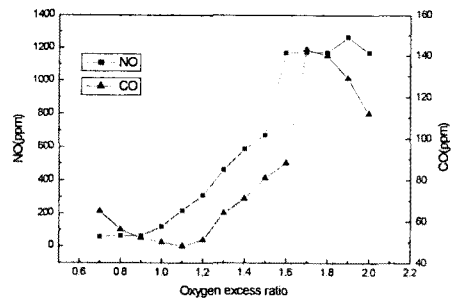


Fig. 8 Emission concentration with oxygen excess ratio

Fig. 8은 산소과잉률에 따른 NO와 CO의 농도 분포를 나타낸다. $\lambda=1.5$ 이

상에서 NO 및 CO의 농도가 급격히 증가하고 있다. 이 조건에서 연료와의 혼합이 최적 상태가 되고 연소 온도가 최고가 되며 이에 의한 열적 NO가 다량 발생하기 때문으로 생각된다. CO는 이론 산소-연료비 근처에서 가장 적게 발생하고 λ 가 커짐에 따라 증가하다가 $\lambda=1.7$ 이상에선 다시 감소한다.

4. 결론

- (1) 선회수 0인 일반화염에서 산소과잉률이 커짐에 따라 화염의 길이는 줄어들고, 폭은 가늘어지며, 훨씬 밝아진다.
- (2) 화염의 온도는 선회수 0인 일반화염에서는 산소과잉률이 클수록 높으나, 선회수 0.6이상의 평면화염에서는 $\lambda=2$ 일 때 가장 높다.
- (3) NO의 농도는 산소과잉률이 커짐에 따라 선회수에 따른 차이가 심해지며, CO는 선회수가 클수록 많이 발생한다.
- (4) 선회수 0인 일반화염에서 산소과잉률 1.5를 전후해 NO와 CO의 농도가 급격히 증가한다.

참고문헌

- (1) 한진수, 이용희, 1994, "순산소버너를 이용한 회전용해로의 주철주물 용해 기술", 구조, 제14권, 제6호, pp. 489-494
- (2) Casimir J. Jachimowski, "Chemical kinetic reaction mechanism for the combustion of propane", Combust. flame 55:213-224(1984)
- (3) Itsuro Kimura, "Stability of laminar jet flames", Tenth Symposium(International) on Combustion, The Combustion

Institute, 1965, pp.1295-1300.

- (4) 유현석, 오신규, 1995, "동축분류 확산화염에서 화염안정화와 연소특성에 관한 연구", 대한기계학회 논문집, 제19권, 제2호, pp.509-518
- (5) 최병륜, 장인갑, 최경민, 1996, "난류 확산화염의 화염구조와 연소특성에 관한 실험적 연구", 대한기계학회 논문집, 제20권, 제3호, pp.1028-1039
- (6) A. Belframe et. al., "Soot and NO formation in methane-oxygen enriched diffusion flame", Combust. flame 124:295-310(2001)
- (7) Jean Lambert, Mikhail Sorin, 1997, "Analysis of oxygen-enriched combustion for SMR, Energy, Vol. 22, No. 8, pp.817-825